

氏 名	藤山 将士
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	第5463号
学位授与年月日	平成22年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文名	振動物体が生成する量子乱流の数値解析的研究 ～古典乱流、量子乱流の間に存在する普遍的性質～ (Numerical analysis of quantum turbulence created by oscillating objects -Universal law underlying classical and quantum turbulence-)
論文審査委員	主査教授 坪田 誠 副査教授 畑 徹 副査 准教授 矢野 英雄

論文内容の要旨

振動物体によって量子乱流を生成する二つの実験を取り上げ、数値計算による実験の再現、及び量子乱流、古典乱流に現れる共通の性質について議論した。

1、振動細線による量子乱流生成

大阪市立大学の実験グループは超流動 4He で細線を振動させる手法で、残留渦が乱流遷移に及ぼす影響を調べた。その結果残留渦が付着していない振動細線を実現し、渦が付着していない振動細線に渦輪が衝突すると乱流遷移する事を突き止めた。更に渦輪の供給が止まっても細線を振動させ続ける限り乱流が維持する事を発見した。この乱流生成、維持のメカニズムを調べるために、量子渦のダイナミクスを数値計算し、乱流を再現することに成功し、乱流生成過程を明らかにした。一方で渦輪供給が止まると乱流が維持されないことも確認した。この原因について Hanninen 達が行った乱流が維持される数値計算と比較することで、乱流が維持される臨界速度を導出した。更に振動細線に働く抗力を数値計算し、振動速度と抗力の関係が古典乱流と量子乱流で共通していることを発見した。

2、振動 grid による量子乱流生成

Lancaster 大学の実験グループは振動細線を用いて量子乱流を生成し、その生成過程を説明した。更に量子乱流の減衰を観測して、乱流が古典乱流の統計測である Kolmogorov 則に従うことを発見した。更に量子乱流の渦糸長密度に関する揺らぎを測定し、揺らぎの周波数スペクトルが冪則に従うことを発見した。これに対し我々は実験を再現すべく数値計算を行い、実験グループが描いた乱流生成の過程、量子乱流の減衰、渦糸長密度の揺らぎの冪則が数値計算で再現されることを示した。更に渦糸長密度揺らぎのスペクトルから実空間における渦輪のサイズ分布を導出し、揺らぎの原因が渦の成長過程であることを突き止めた。また幾つかの仮定を導入することで揺らぎの冪則、渦輪サイズ分布の冪則、波数空間におけるエネルギースペクトルの冪則が全て結び付けられることを導出した。

論文審査の結果の要旨

量子乱流は、超流動中で実現する量子渦の乱流である。量子流体では、古典流体とは異なり、乱流の構成要素である渦が量子化されている。このような流体力学的な相違があるにも関わらず、量子乱流と古典乱流の間には、コルモゴロフ則に代表されるような普遍的な性質が存在することが知られている。本論文は、振動物体を用いた量子乱流生成実験を二つ取り上げ、量子乱流と古典乱流の間に存在する普遍的法則を理解する観点から、数値計算ならびに理論的な考察を行ったものである。

(1) 大阪市立大学の実験グループは残留渦が量子乱流発生に及ぼす影響を調べ、渦輪が振動物体に衝突すると量子乱流が生じる事を観測した。これに関連し、実験をモデル化して量子渦のダイナミクスに関する数値計算を行い、連続照射される渦輪が振動球に衝突すると量子乱流を引き起こすことを初めて明らかにした。振動球に働く抗力を計算し、古典乱流で知られている抗力の速度依存性が、量子乱流でも成り立つ事を見いだしている。

(2) ランカスター大学の実験グループは量子乱流の渦糸長密度揺らぎを解析し、揺らぎの周波数に関するスペクトルが $-5/3$ 乗の冪則に従う事を観測した。この実験をモデル化して量子渦のダイ

ナミクスから量子乱流を再現し、揺らぎに関する冪則を解明するための理論的な考察を行った。その結果、渦輪が衝突して乱流へと成長していく過程が揺らぎの冪則の本質であることを見いだした。また乱流における波数空間の自己相似的構造と、実空間及び時間的な自己相似的構造を結びつけ、量子乱流の構造を理解するための考察を行っている。

このように本論文は、量子乱流に関する独創的な理論的および数値的研究を行い、量子乱流と古典乱流の間に存在する普遍的な法則に関する新たな知見を提供したものであり、博士（理学）の学位を授与するに値するものと認められると審査した。